

УДК 621.91

С.А. Клименко, д-р техн. наук, А.С. Манохин, канд. техн. наук,  
М.Ю. Копейкина, канд. техн. наук, Киев, Украина

## **СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТОВ С ПСТМ НА ОСНОВЕ cBN ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ**

*Виконано комплекс досліджень окислення і зміни механічних властивостей поверхневого шару полікристалічних надтвердих матеріалів на основі cBN при їх використанні у різальному інструменті. Запропоновано гіпотезу, яка пояснює зв'язок еволюції структурного стану і механічних властивостей поверхневого шару інструментів, оснащених ПНТМ на основі cBN, з механізмом їх зношування.*

*Выполнен комплекс исследований окисления и изменения механических свойств поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых материалов на основе cBN при их использовании в режущем инструменте. Предложена гипотеза, связывающая процесс эволюции структурного состояния и механических свойств поверхностного слоя инструментов, оснащенных ПСТМ на основе cBN, с механизмом их изнашивания.*

*A complex studies of oxidation and changes in mechanical properties of the surface-layer superhard polycrystalline cBN-based materials, when used in a cutting tool. The hypothesis linking the evolution of the structural state and mechanical properties of the surface layer of tools, equipped with PSTM based on cBN, with the mechanism of wear.*

### **Введение.**

Состояние поверхностного слоя режущего инструмента во многом обусловлено воздействием тепла, генерируемого в зоне резания. Для совершенствования путей повышения эффективности инструмента необходимо установить зоны влияния тепла, в которых могут происходить явления, связанные с изменениями химического состава и механических характеристик материала поверхностного слоя инструмента.

Это во многом относится к инструментам, оснащенным поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (cBN), которым эффективно обрабатываются изделия из сталей и сплавов высокой твердости [1, 2]. Инструменты работают на воздухе со скоростями, которым соответствует температура в зоне резания до 1200 °С.

**Целью настоящего исследования** было изучение состояния поверхностного слоя инструментов с ПСТМ на основе cBN (композиты – cBN+10%TiN+30%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; cBN+15%TaN+15%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>+10%SiC; cBN+3%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) при точении закаленной стали ШХ15 (62-64 HRC).

### **Полученные результаты и их обсуждение.**

В зависимости от состава, различные композиты взаимодействуют с

кислородом воздуха при разных условиях. ПСТМ являются сложными материалами и с кислородом воздуха взаимодействуют не только частицы cBN, но и другие компоненты композитов – TiN, TaN, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Вступая в реакцию с кислородом, составляющие композита образуют систему окислов, что обуславливает нарушение структуры и межзеренных связей в материале. В таком состоянии поверхностный слой ПСТМ характеризуется пониженными механическими свойствами, в результате чего возрастает вероятность его разрушения.

В [2] показано, что в условиях обработки со скоростями резания 1,5-3,0 м/с ( $T = 1000-1250$  °C) на контактных поверхностях инструмента с ПСТМ на основе cBN имеет место химическое взаимодействие между материалом инструмента, обрабатываемыми материалами и элементами окружающей среды. Анализ результатов исследования показывает, что в механизме химического изнашивания следует выделить составляющую, связанную с окислением инструментального материала. Появление изменений в структуре и механических свойствах материала поверхностного слоя инструментального композита вероятно при воздействии высоких температур, потому за величину температурного нагружения нами принята температура 1200 °C, отвечающая скорости резания 2,35 м/с и подаче  $S = 0,10$  мм/об для случая точения закаленной стали ШХ15 инструментом с фаской износа 0,3 мм. Результаты моделирования методом конечных элементов распределения температуры в режущем инструменте показаны на рис. 1.

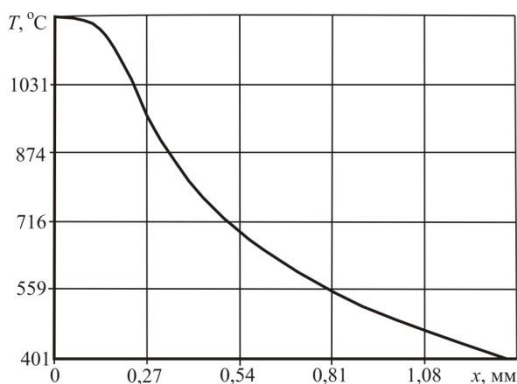


Рисунок 1 – Распределение температуры в инструменте

Из анализа полученных результатов следует, что на участке инструмента, прилегающем к контактному со стружкой участку, градиент температуры вдоль оси  $X$  составляет  $\sim 140$  К/мм. Это позволяет оценить величины температурного нагружения для участков, на которых следует выполнить

оценку химического состава и механических свойств поверхностного слоя материала инструмента после эксплуатационного нарушения.

Для инструмента с композитом  $\text{cBN}+\text{TiN}+\text{Si}_3\text{N}_4$  характерным является наличие участков с хрупким разрушением со стороны задней поверхности (рис. 2, а), что свидетельствует о значительных контактных напряжениях на передней поверхности инструмента и недостаточной прочности композита при эксплуатации в условиях высоких температур. На участке пластического контакта на передней поверхности инструмента наблюдается слой обрабатываемого материала (рис. 2, б), налипший в результате интенсивного адгезионного взаимодействия в зоне резания. Общий вид участка контакта инструмента по передней поверхности позволяет сделать вывод про существенное влияние абразивно-адгезионного механизма изнашивания, приводящего к быстрому разрушению инструмента.

Режущий инструмент с композитом  $\text{cBN}+\text{TaN}+\text{Si}_3\text{N}_4+\text{SiC}$  не имел следов разрушения в виде сколов и выкрашиваний до момента формирования фаски износа шириной  $h_z=0,35$  мм, после чего инструмент разрушается по передней поверхности (рис. 2, в). Налипание обрабатываемого материала на контактных поверхностях инструмента также наблюдается, но имеет значительно меньшую интенсивность в сравнении с ранее рассмотренным случаем.

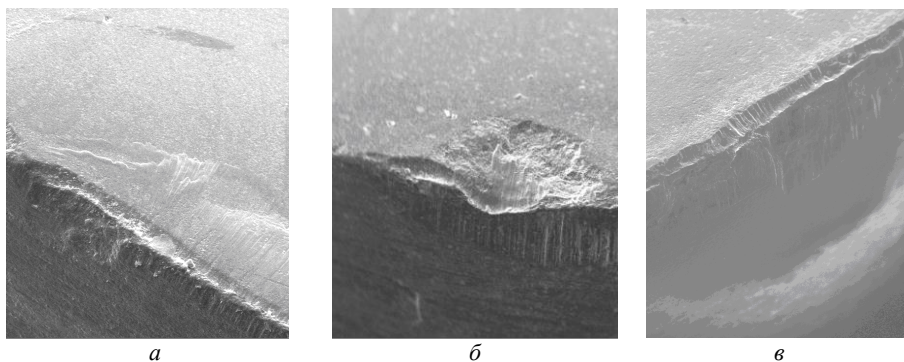


Рисунок 2 – Контактные участки режущих инструментов

после обработки ( $v = 2,35$  м/с) стали ШХ15:

а –  $\text{cBN}+\text{TiN}+\text{Si}_3\text{N}_4$ ;  $h_z = 0,30$  мм;

б –  $\text{cBN}+\text{TaN}+\text{Si}_3\text{N}_4+\text{SiC}$ ;  $h_z = 0,35$  мм;

в –  $\text{cBN}+\text{Si}_3\text{N}_4$ ;  $h_z = 0,25$  мм

Изнашивание инструмента, оснащенного композитом  $\text{cBN}+\text{Si}_3\text{N}_4$ , имеет усталостно-механический характер.

Химический состав поверхности режущих инструментов на контактных участках определялся методом микрорентгеноспектрального анализа.

Повышенное содержание железа и кислорода на поверхности инструмента связано с налипанием частиц обрабатываемого материала и продуктов взаимодействия контактирующих материалов.

Химические реакции при взаимодействии в системе cBN – (Fe, Ni, Cr) на воздухе приводят к образованию соединений типа  $(\text{Fe, Ni, Cr})_x\text{B}_y\text{O}_z$ , содержащих кислород [2]. Кислород на поверхности режущего инструмента появляется также в результате окисления на воздухе элементов, входящих в состав ПСТМ, при действии высокой температуры. Зона, где при высокоскоростной обработки такие процессы интенсивно протекают, достаточно велика и удалена от режущей кромки на расстояние до 0,3 мм.

На рис. 3 представлены диаграммы распределения кислорода на передней поверхности инструментов с композитами на основе cBN в направлении, перпендикулярном режущей кромке.

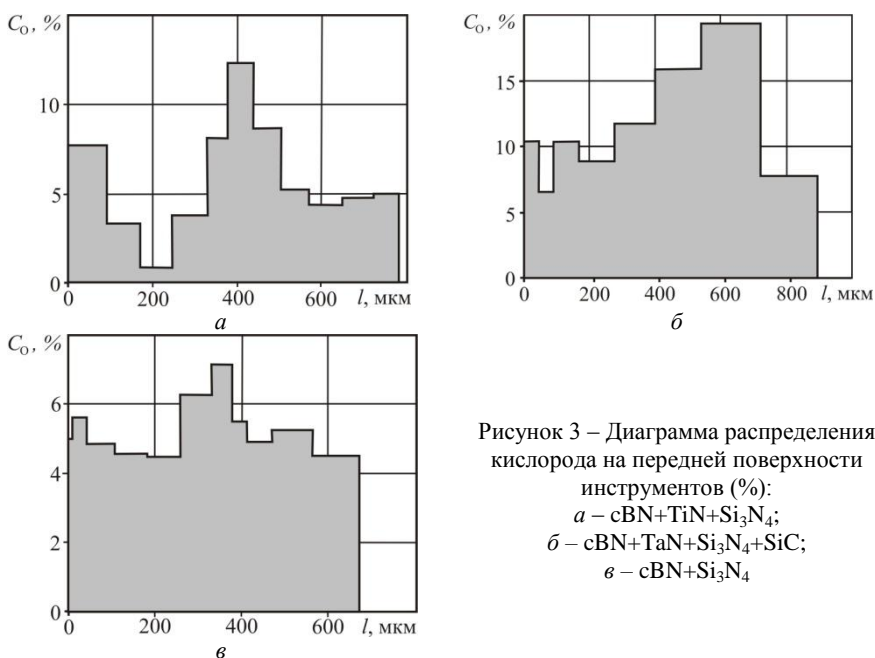


Рисунок 3 – Диаграмма распределения кислорода на передней поверхности инструментов (%):  
 а – cBN+TiN+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>;  
 б – cBN+TaN+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>+SiC;  
 в – cBN+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Для всех исследованных инструментов характерным является наличие относительно низкого количества кислорода на расстоянии до  $x = 180\text{--}200$  мкм от режущей кромки. При длине контакта стружки с передней

поверхностью инструмента  $\sim 120$  мкм, этот участок изолирован от внешней среды. На расстоянии  $> 250$  мкм от режущей кромки для исследуемых инструментов имело место увеличение содержания кислорода с максимумом при  $x = 300\text{--}600$  мкм. Это объясняется тем, что более удаленная от режущей кромки зона инструмента открыта для взаимодействия с кислородом воздуха. В эту же зону выносятся продукты взаимодействия материала инструмента и обрабатываемого материала, содержащие кислород.

Результаты расчетов свидетельствует о наличии корреляционной связи между содержанием кислорода на передней поверхности инструмента, отнесенным ко времени работы инструмента,  $C_o^{отн}$  и скоростью его изнашивания  $j$  (табл. 1). Из исследованных инструментов наибольшей работоспособностью в условиях высокоскоростного резания закаленной стали характеризуются резцы, оснащенные композитом с высоким содержанием сверхтвердой фазы и резцы, оснащенные материалом с низким содержанием cBN при наличии в композите TiN и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $< 15\%$ ). Данные о содержании кислорода на поверхности инструмента позволяют сделать вывод о том, что повышенная стойкость режущих инструментов с композитом cBN+TaN+ $\text{Si}_3\text{N}_4$ +SiC, в сравнении с инструментом с другим композитом с низким содержанием cBN, связана с меньшей интенсивностью окислительного процесса в зоне резания.

Таблица 1 – Содержание кислорода на поверхности и скорость изнашивания инструментов

Композит	$C_o^{отн}$ , %/мин	$j$ , мкм/мин
cBN+TiN+ $\text{Si}_3\text{N}_4$	3,28	180
cBN+TaN+ $\text{Si}_3\text{N}_4$ +SiC	0,85	27
cBN+ $\text{Si}_3\text{N}_4$	0,51	25

Для оценки изменения механических свойств материала поверхностного слоя инструментов выполнена серия исследований методом ScratchTest и установлена величины тангенциальной силы сопротивления поверхностного слоя инструментов контактному взаимодействию  $F_\tau$  вдоль трассы сканирования.

Анализ полученных результатов позволяет установить корреляционную связь между изменением механических свойств поверхностного слоя ПСТМ и состоянием его рабочих поверхностей (табл. 2).

На этапе равномерного износа ( $0,1 \text{ мм} < h_3 < 0,3 \text{ мм}$ ) изменения силы  $F_\tau$  не выявлено. Значительные изменения силы  $F_\tau$  наблюдаются при величинах износа инструмента, близких к величине, отвечающей критерию стойкости

( $h_z \approx 0,32\text{--}0,35$  мм). На расстоянии  $x > 200$  мкм от режущей кромки сила  $F_\tau$  снижается, достигая минимального значения при  $x = 240\text{--}270$  мкм (инструмент с композитом cBN+TiN+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) и  $x = 340\text{--}420$  мкм (инструмент с композитом cBN+TaN+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>+SiC). Такой характер зависимости силы  $F_\tau$  от координаты  $x$ , характерен инструментам, для которых было достигнуто критическое значения ширины фаски износа и имело место разрушение режущей кромки. Нужно отметить, что снижение силы  $F_\tau$  свидетельствует о локальном увеличении микротвердости, проявляющееся в уменьшении глубины внедрения индентора в исследуемый композит.

Таблица 2 – Склерометрические характеристики поверхностного слоя инструментов

Композит	Участок измерений на инструменте	$M[F_\tau]$ , сН	$\sigma[F_\tau]$ , сН <sup>2</sup>
cBN+TiN+Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	контрольный	7,79	0,83
	приближенный к зоне износа	5,71	0,89
cBN+TaN+Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> +SiC	контрольный	6,87	0,69
	приближенный к зоне износа	7,3	1,4
cBN+Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	контрольный участок	7,84	1,49
	приближенный к зоне износа	7,15	1,41

Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента при  $S = 0,1$  мм/об составляет  $\sim 80$  мкм. Таким образом зона инструмента, в которой наблюдаются существенные изменения механических свойств композита, находится за пределами контактного участка. В связи с этим, пояснить появление на поверхности инструмента зон, где сила  $F_\tau$  имеет экстремальные значения, только трибохимическими эффектами в паре «стружка-инструмент» невозможно.

По результатам расчетно-экспериментальной оценки, температура поверхностного слоя режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN, при обработке со скоростью резания 2,35 м/с на рассматриваемых участках достигает  $T = 1000\text{--}950$  и  $T = 860\text{--}780$  °С соответственно, что достаточно для того, что бы связать зону повышенной твердости с возможностью окисления свободных, незащищенных стружкой поверхностей инструмента. Большие размеры этой зоны во втором случае объясняются тем, что время резания было существенно большим (1,4 и 13,6 мин соответственно).

**Выводы.** Анализ полученных результатов позволяет заключить, что расположение зон, где наблюдается снижения силы  $F_{\tau}$ , совпадает с началом участков, где содержание кислорода на передней поверхности инструмента начинает возрастать.

В качестве гипотезы, связывающей процесс эволюции структурного состояния и механических свойств поверхностного слоя инструментов, оснащенных композитами на основе cBN, с механизмом их изнашивания, можно принять следующее. Окисление свободных участков поверхности инструментов, непосредственно примыкающих к контактными зонам «инструмент–обрабатываемый материал», приводит к некоторому повышению твердости (за счет формирования вторичных структур II-го рода [3]) и снижению прочности материала их поверхностного слоя, что обуславливает микроскалывание фрагментов инструментального композита, вызывая ускоренное изнашивание инструмента.

**Список использованных источников:** 1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.; 2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2006. – 316 с.; 3. Поверхностная прочность материалов при трении / Под ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техніка, 1976.– 296 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / Pod. red. N.V. Novikova i S.A. Klimenko. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 608 s.; 2. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primeneniye: V 6-i t. / Pod obshch. red. N.V. Novikova. – T.5: Obrabotka materialov lezviinym instrumentom / Pod red. S.A. Klimenko. – K.: ISM im. V.N. Bakulya, IPTSH «ALKON» NAN Ukrainy, 2006. – 316 s.; 3. Poverhnostnaya prochnost' materialov pri trenii / Pod red. B.I. Kostetskogo. – K.: Tehnika, 1976.– 296 s.

*Поступила в редколлегию 30.07.2015*